

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
18 août 2005 (18.08.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2005/076421 A2**

(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : **H01S 3/13**

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2005/050044

(22) Date de dépôt international :  
25 janvier 2005 (25.01.2005)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
04 50135 26 janvier 2004 (26.01.2004) FR

(71) Déposants (*pour tous les États désignés sauf US*) :  
**AMPLITUDE SYSTEMES** [FR/FR]; 351 Cours de la  
Libération, F-33400 TALENCE (FR). **CENTRE NA-  
TIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
(CNRS) [FR/FR]; 3 rue Michel Ange, F-75794 PARIS  
cedex 16 (FR). **UNIVERSITE DE BORDEAUX 1**  
[FR/FR]; 351 Cours de la Libération, F-33400 TALENCE  
(FR).

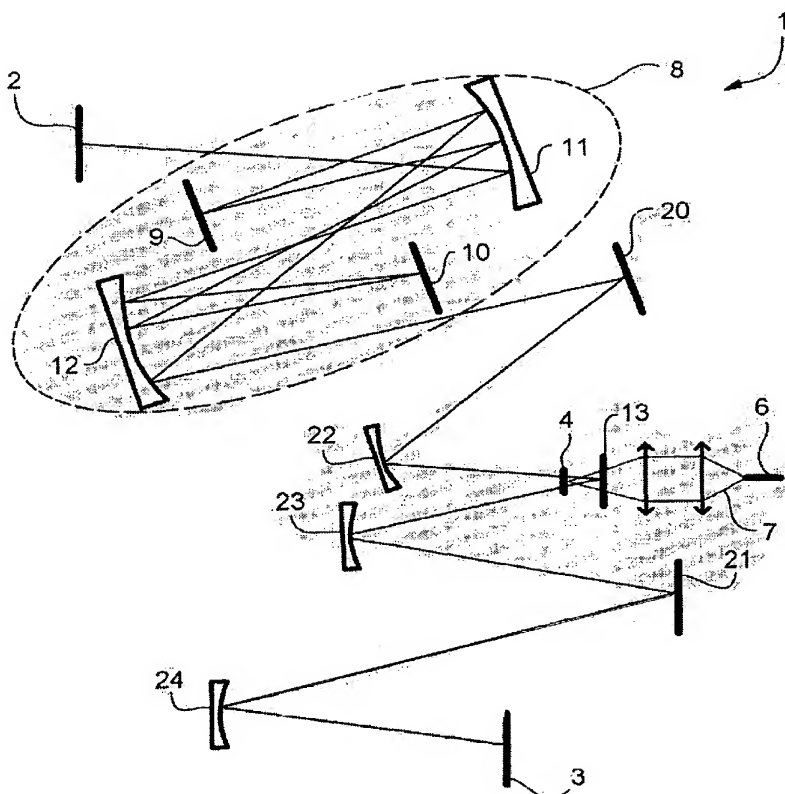
(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : **HON-  
NINGER, Clemens** [DE/FR]; Résidence Martinon Bât.  
B, Rue des Fontaines de Monjous, F-33170 GRADIGNAN  
(FR). **COURJAUD, Antoine** [FR/FR]; Bât. A Résidence

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: ULTRA-SHORT LASER SOURCE WITH RARE EARTH IONS AND STABLE PULSE TRAIN AND DEVICE FOR  
LENGTHENING A LASER CAVITY

(54) Titre : SOURCE LASER ULTRABREVE A IONS TERRE RARE A TRAIN D'IMPULSIONS STABLE ET DISPOSITIF  
D'ALLONGEMENT D'UNE CAVITE LASER



(57) Abstract: The invention relates to an ultra-short laser source with rare earth ions, comprising a resonant cavity (1) having a first partially-reflective output face (2) and a second reflective face (3). The inventive source also comprises a first active material (4) which receives a pump light flux (6) that is emitted by a first solid laser pump source (7). According to the invention, the optical path length of the resonant cavity (1), which is travelled by the aforementioned pulses, is greater than 7.5 m, such that the energy  $E_L$  per pulse is greater than 100 nJ, said optical path comprising at least one passage in the active material (4). In addition, the ultra-short laser source comprises means for lengthening the resonant cavity (1), which can be used to extend the optical path length travelled by the light pulses in the resonant cavity (1) of a compact laser source. Moreover, the propagation matrix ABCD of the resonant cavity (1) is similar to the unit

[Suite sur la page suivante]

WO 2005/076421 A2



de l'Eté, Place du Printemps, F-33600 PESSAC (FR).  
**MOTTAY, Eric** [FR/FR]; 45 rue de Verdun, F-33130  
 BEGLES (FR). **SALIN, François** [FR/FR]; 50 rue du  
 Chouiney, F-33170 GRADIGNAN (FR).

(74) **Mandataires :** **CATHERINE, Alain** etc.; 7 rue de  
 Madrid, F-75008 PARIS (FR).

(81) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publiée :**

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

matrix, such that the characteristics of the light beam travelling to and fro in the resonant cavity (1) are unchanged.

(57) **Abrégé :** L'invention concerne une source laser ultrabrève à ions terre rare comportant une cavité résonante (1) ayant une première face de sortie (2) partiellement réfléchissante et une deuxième face réfléchissante (3). Cette source comprend également un premier matériau actif (4). Ce premier matériau (4) reçoit un flux lumineux de pompe (6) émis par une première source de pompe laser (7) solide. Selon l'invention, la cavité résonante (1) présente une longueur de chemin optique parcourue par lesdites impulsions supérieure à 7,5 m de sorte que l'énergie  $E_L$  par impulsion soit supérieure à 100 nJ, ledit chemin optique comprenant au moins un passage dans ledit matériau actif (4) et la source laser ultrabrève comprend des moyens pour allonger la cavité résonante (1) permettant d'étendre la longueur de chemin optique parcouru par lesdites impulsions lumineuses dans la cavité résonante (1) d'une source laser compacte, la matrice ABCD de propagation de ladite cavité résonante (1) étant proche de la matrice unitaire de sorte que les caractéristiques du faisceau lumineux effectuant des allers-retours dans la cavité résonante (1) sont inchangées.

## **Source laser ultrabrève à ions terre rare à train d'impulsions stable et dispositif d'allongement d'une cavité laser**

La présente invention concerne une source laser ultrabrève à ions terre rare à train d'impulsions stable.

Depuis la réalisation par Ippen et Shank en 1974 [Appl. Phys. Letters; 24, (1974) 373] du premier laser émettant des impulsions plus courtes que la picoseconde ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ), la durée des impulsions laser n'a cessé de raccourcir. Les lasers qui génèrent des impulsions dont la durée est inférieure à la picoseconde sont dénommés "Lasers ultrabrefs". Ils suscitent un vaste engouement et d'intenses efforts de recherche dans la communauté scientifique parce que les impulsions ultrabrefs qu'ils génèrent permettent l'étude temporelle de la dynamique de processus ultrarapides (inférieur à  $10^{-10} \text{ s}$ ) jusqu'alors inaccessibles à la plupart des détecteurs. Avec ces sources de lumière ultrabrève, de nouveaux champs d'investigations et d'applications s'ouvrent comme dans les processus de fragmentation et/ou désorption de molécules adsorbées multiphotoniques, la métrologie, les études non destructives de mécanismes chimiques dans les cellules biologiques, etc.

On connaît des lasers générant des impulsions ultrabrefs faisant intervenir des milieux amplificateurs à ions terre rare (Ytterbium (Yb), Néodyme (Nd),...). Ces lasers présentent l'avantage de pouvoir être pompés directement par un laser semi-conducteur, ce qui en fait des lasers compacts, fiables et peu onéreux. En particulier, les milieux amplificateurs dopés à l'ion Ytterbium peuvent être pompés par des diodes lasers de puissance car l'ion Ytterbium présente une bande d'absorption dans le proche infrarouge. L'accord entre la longueur d'onde d'émission de la diode laser de puissance avec une raie d'absorption du milieu amplificateur dopé à l'ion Ytterbium permet une excellente efficacité de couplage. De plus, la longueur d'onde d'émission de la diode laser de puissance est proche de la longueur d'onde d'émission laser qui est typiquement comprise entre 1020 et 1070 nm. Il en résulte un excellent rendement quantique et une faible déperdition de chaleur dans le milieu amplificateur.

Un problème majeur, cependant, dans la génération stable d'impulsions ultrabrefs pour les lasers réside dans la détermination de paramètres permettant d'obtenir un blocage de modes sans Q-switching ("Mode déclenché" - QS). Le blocage de modes contribue en effet à l'obtention d'impulsions

ultrabrèves tandis que le mode déclenché se caractérise par l'apparition d'instabilités dans le train d'impulsions ultrabrèves émis par le laser ultrabref. Ces instabilités peuvent se traduire par de fortes modulations dans le train d'impulsions. Ces instabilités sont notamment prononcées pour des lasers ultrabrefs utilisant des milieux amplificateurs à faibles sections efficaces d'émission dont les milieux amplificateurs dopés à l'ion Ytterbium font partie. Une stratégie pour éviter ces instabilités qui sont caractéristiques d'un régime déclenché, consiste à choisir des paramètres pour le laser, notamment des diamètres du mode laser dans le milieu amplificateur, ... permettant d'éliminer ces instabilités tout en permettant le blocage de modes. Cette stratégie conduit donc à éviter la mise en œuvre de configurations lasers dans lesquelles la fenêtre d'obtention d'un blocage de modes stable est trop courte ou n'existe pas. Or, éviter ces configurations est problématique pour des milieux amplificateurs à ions terre rare présentant un temps de relaxation du niveau supérieur important ou une faible section efficace d'émission.

A cet effet le mode déclenché rend donc difficilement utilisables les lasers ultrabrefs utilisant des milieux amplificateurs à ions terre rare dans des applications nécessitant un comportement fiable et stable dans le temps.

Jusqu'à présent aucun moyen n'a été proposé, permettant d'assurer une stabilité satisfaisante

L'objectif de la présente invention est de proposer une source laser ultrabrève à ions terre rare simple dans sa conception et dans son mode opératoire, compacte, peu onéreuse et permettant d'obtenir un train continu d'impulsions ultrabrèves stable avec une énergie par impulsion très haute, i.e. supérieure typiquement à 100 nJ.

A cet effet, l'invention concerne une source laser ultrabrève à ions terre rare comportant d'une part une cavité résonante ayant une première face de sortie partiellement réfléchissante et une deuxième face réfléchissante, et d'autre part un premier matériau actif, placé à l'intérieur de la cavité résonante, ayant une fluence de saturation supérieure à  $3 \text{ J/cm}^2$  et recevant un flux lumineux de pompe, ledit flux étant émis par une première source de pompe laser solide, ladite source émettant des impulsions lumineuses ayant une énergie  $E_L$ .

Selon l'invention,

- la cavité résonante présente une longueur de chemin optique parcourue par lesdites impulsions supérieure à 7,5 m de sorte que

l'énergie  $E_L$  par impulsion soit supérieure à 100 nJ, ledit chemin optique comprenant au moins un passage dans ledit matériau actif,

- la source laser ultrabrève comprend des moyens pour allonger la cavité résonante permettant d'étendre la longueur du chemin optique parcouru par lesdites impulsions lumineuses dans la cavité résonante d'une source laser compacte, la matrice ABCD de propagation de la cavité résonante étant proche de la matrice unitaire de sorte que les caractéristiques du faisceau lumineux effectuant des allers-retours dans la cavité résonante sont inchangées.

On entend ici par "source laser ultrabrève", une source laser émettant des impulsions lumineuses ayant une durée inférieure à 10 picosecondes et encore mieux, inférieure à une picoseconde.

Dans différents modes de réalisation possibles, la présente invention concerne également les caractéristiques qui ressortiront au cours de la description qui va suivre et qui devront être considérées isolément ou selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles :

- la longueur de chemin optique est comprise entre 7,5 m et 300 m,
- les moyens pour allonger la cavité comprennent au moins un dispositif d'allongement de la cavité comportant à une première extrémité un premier miroir plan et à l'autre extrémité un deuxième miroir plan, lesdits premier et deuxième miroirs plans étant placés respectivement au foyer respectif d'un premier et deuxième miroirs sphériques concaves, ledit deuxième miroir plan ayant un axe normal à sa surface incliné verticalement d'un angle  $\theta/n$  par rapport à un plan parallèle au plan contenant le premier miroir plan de sorte qu'une impulsion lumineuse entrant dans ledit dispositif sous un angle d'incidence  $\theta$  dans un plan vertical et sous un angle  $\Phi$  dans un plan horizontal par rapport à la normale à la surface du premier miroir plan subisse  $n/2$  réflexions sur le deuxième miroir sphérique avant de sortir dudit dispositif,
- un miroir d'entrée, placé en avant et espacé du premier miroir sphérique permet l'injection et l'éjection des impulsions lumineuses dans le dispositif d'allongement de la cavité,
- la source laser comprend au moins un deuxième matériau actif placé à l'intérieur de la cavité résonante, ledit deuxième matériau actif recevant un flux lumineux de pompe,
- ledit flux lumineux de pompe est émis par une deuxième source de pompe laser solide,

- le nombre de passage dans chaque matériau actif est supérieur ou égal à 2,
- le nombre de passage dans chaque matériau actif est égal à 4,
- la source laser ultrabrève comprend un miroir dichroïque placée entre ledit matériau actif et la source de pompe laser solide correspondante, ledit miroir recevant les impulsions lumineuses dudit matériau actif et réfléchissant lesdites impulsions lumineuses vers le matériau actif,
- la source de pompe laser solide est un laser semi-conducteur,
- le matériau actif comprend des ions ytterbium,
- le matériau actif comprend des ions néodyme.

L'invention concerne également un dispositif d'allongement d'une cavité laser définissant un axe optique.

Selon l'invention, ce dispositif comprend deux miroirs plans placés au foyer respectif de deux miroirs sphériques concaves, lesdits foyers étant sur l'axe de la cavité et l'un des miroirs plans étant incliné d'un angle  $\theta/n$  par rapport à cet axe.

Cette disposition permet d'allonger la cavité tout en conservant les propriétés du faisceau.

L'invention sera décrite plus en détail en référence aux dessins annexés dans lesquels:

- la figure 1 est une représentation schématique d'une source laser ultrabrève, selon un premier mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 2 est une représentation schématique et un dispositif d'allongement de la cavité selon un mode de réalisation particulier de l'invention ;
- la figure 3 est une représentation schématique d'une source laser ultrabrève, selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 4 est une représentation schématique d'une source laser ultrabrève, selon un troisième mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 5 montre un spectre obtenu dans un premier mode de mise en œuvre de l'invention ;
- la figure 6 montre l'auto-corrélation obtenue dans le mode de mise en œuvre de la figure 5 ;

Le but de l'invention est d'éliminer les instabilités liées au régime déclenché dans des sources lasers ultrabrèves à ions terre rare au moyen d'une cavité résonante de grande longueur et/ou au moyen d'une configuration de la cavité résonante permettant plusieurs passages dans au moins un milieu

amplificateur par aller-retour de cavité.

La source laser ultrabrève à ions terre rare de l'invention comporte une cavité résonante 1 ayant une première face de sortie 2 partiellement réfléchissante et une deuxième face réfléchissante 3. Entre ces deux faces 2,3 est défini un chemin optique parcouru par les impulsions lumineuses, ledit chemin optique comprenant au moins un passage dans un premier matériau actif 4 ayant une fluence de saturation supérieure à  $3 \text{ J/cm}^2$ , placé à l'intérieur de la cavité résonante 1. Dans un mode de réalisation préférentiel, la cavité résonante 1 comporte au moins un deuxième matériau actif 5 ayant une fluence de saturation supérieure à  $3 \text{ J/cm}^2$ . Chacun desdits matériaux 4,5 actifs peut être pompé par une source laser de pompe différente 6. Ces sources lasers de pompe 6 sont des lasers solides émettant un flux lumineux de pompe 7. Dans un mode de réalisation préféré, chaque source laser de pompe 6 est un laser semi-conducteur. La longueur d'onde  $\lambda_D$  sur laquelle est centrée le flux lumineux de pompe 7 est typiquement comprise entre 800 nm et  $1 \mu\text{m}$ . Les ions terre rare utilisés dans le matériau actif 4 sont choisis parmi un des matériaux suivants : Ytterbium (Yb), Néodyme (Nd) ou tout autre matériau équivalent.

La longueur de chemin optique parcourue par lesdites impulsions dans la cavité résonante 1 est supérieure à 7,5 m de sorte que l'énergie  $E_L$  par impulsion soit supérieure à 100 nJ pour une puissance moyenne de 2 W.

La Figure 1 montre une source laser ultrabrève à ions terre rare selon un premier mode de réalisation de l'invention. La distance séparant les première et deuxième faces 2, 3 est typiquement de l'ordre de quelques mètres, par exemple 3,33 m ce qui correspond à une cadence de 45 MHz en régime de modes bloqués. La cavité est repliée par les miroirs plans 20, 21 et par les miroirs concaves 22, 23, 24. Elle comprend également un seul matériau actif 4 ayant une fluence de saturation supérieure à  $3 \text{ J/cm}^2$ , par exemple un cristal Yb :KGW, ce matériau actif 4 étant placé à l'intérieur de la cavité résonante 1. Ce matériau actif 4 reçoit un flux lumineux de pompe 7 émis par une source de pompe laser solide 6 qui est préférentiellement un laser semi-conducteur. De manière à allonger la longueur de chemin optique parcouru par les impulsions dans la cavité résonante 1, cette cavité 1 comprend des moyens pour allonger la cavité résonante. L'allongement de la longueur de chemin optique est obtenu en faisant parcourir aux impulsions lumineuses de multiples passages laser à l'intérieur d'au moins un dispositif d'allongement de la cavité 8.

La matrice ABCD de propagation de la cavité résonante est proche de la matrice unitaire de sorte que les caractéristiques (divergence, dimension,...) du faisceau lumineux effectuant des allers-retours dans la cavité résonante 1 sont inchangées. Les paramètres géométriques de la cavité résonante comprenant les moyens d'allongement par rapport à une cavité plus courte sans moyens d'allongement sont identiques.

Les caractéristiques optiques d'un faisceau laser sont très différentes de celles des faisceaux lumineux conventionnels issus de sources naturelles ou artificielles (soleil, lampes,...). Les théories de l'optique géométrique s'avèrent insuffisantes pour décrire les transformations spatiales des faisceaux laser. La propagation des faisceaux lasers fait largement appel au phénomène de diffraction.

Ainsi, une matrice ABCD de propagation ou matrice de transfert de l'article « Laser Beams and Resonators » (H. Kogelnik and T. Li, Applied Optics, vol. 5 No. 10, octobre 1966) décrit la transformation subie par un rayon lumineux se propageant entre deux plans encadrant un système optique paraxial. Cette matrice agit sur les coordonnées d'un rayon issu du plan de départ. Elle concerne entre autre les faisceaux gaussiens.

Les moyens pour allonger la cavité 8 comprennent ici un seul dispositif d'allongement de la cavité représenté sur la Figure 2 comportant à une première extrémité un premier miroir plan d'entrée 9 et à l'autre extrémité un deuxième miroir plan 10. Ces premier et deuxième miroirs plans 9, 10 sont placés respectivement au foyer respectif d'un premier et d'un deuxième miroirs courbes 11, 12. La séparation entre les miroirs courbes 11, 12 est équivalente à la somme de leur focale. Avantagusement, ces miroirs courbes 11, 12 sont des miroirs sphériques concaves. Pour réaliser plusieurs passages dans le dispositif d'allongement de la cavité 8, les impulsions lasers entrent dans le dispositif d'allongement 8 sous un angle d'incidence  $\theta$  par rapport à la normale 16 à la surface 17 du premier miroir plan. En inclinant verticalement d'un angle  $\theta/n$ , le deuxième miroir plan 10 à l'autre extrémité du dispositif, les impulsions font  $n$  passages dans le plan vertical du dispositif 8 avant de ressortir par le même chemin. Pour séparer les impulsions lumineuses entrant dans le dispositif 8 et celles sortant du dispositif d'allongement de la cavité 8, les impulsions lumineuses n'entrent pas seulement dans le dispositif 8 sous un angle d'incidence  $\theta$  par rapport à la normale à la surface du premier miroir plan 9, ledit angle étant contenu dans un plan vertical, mais aussi sous un angle  $\Phi$



par rapport à cette normale, ledit angle  $\Phi$  étant contenu dans un plan horizontal. L'injection et l'éjection des impulsions lumineuses se font alors par un miroir d'entrée, par exemple un miroir coupé en demi-lune, placé en avant et décalé vers le bas du premier miroir courbe du dispositif.

La Figure 3 montre une source laser ultrabrève à ions terre rare selon un deuxième mode de réalisation de l'invention. Les éléments de la Figure 2 ayant les mêmes références que les éléments décrits à la Figure 1 représentent les mêmes objets. Dans ce mode de réalisation particulier, en raison de l'orientation des miroirs 20 à 25 dans la cavité, les impulsions lumineuses effectuent plusieurs passages, ici 4, dans le matériau actif 4 par aller-retour dans la cavité résonante 1. Le fait de passer  $m$  fois dans le milieu à gain permet de multiplier le gain linéique par aller-retour dans la cavité résonante 1 par  $m$ , ce qui revient à changer l'amplification  $G$  du milieu en  $G^m$ , sans changer les pertes de la cavité, et permet, pour une énergie d'impulsion donnée, de plus saturer le gain laser. Ce multipassage dans le matériau actif 4 peut être associé à un allongement de la cavité résonante 1 obtenu en mettant en œuvre les moyens pour allonger la cavité. La source laser ultrabrève comprend un miroir dichroïque 13 placée entre ledit matériau actif 4 et la source de pompe laser solide 6 correspondante, ledit miroir 13 recevant les impulsions lumineuses dudit matériau actif 4 et réfléchissant lesdites impulsions lumineuses vers le matériau actif.

La Figure 4 montre une source laser ultrabrève à ions terre rare selon un troisième mode de réalisation de l'invention. Les éléments de la Figure 3 ayant les mêmes références que les éléments décrits à la Figure 2, représentent les mêmes objets. Dans ce mode de réalisation particulier, la source laser comprend au moins un deuxième matériau actif 5 placé à l'intérieur de la cavité résonante 1, les miroirs 22, 23, 24, 27, 28 replient le faisceau et ledit deuxième matériau actif 5 recevant un flux lumineux de pompe 26 émis par une deuxième source de pompe laser solide 15.

La cavité laser comprend la diode laser, l'optique de focalisation dans le milieu de gain, le milieu de gain (Yb:KGW), deux miroirs courbes pour focaliser le mode laser dans le milieu de gain, un troisième miroir courbe pour focaliser le mode laser sur un miroir non-linéaire, afin de démarrer et stabiliser le mode impulsif d'opération du laser. Dans cette configuration, les impulsions passent deux fois dans le milieu à gain par aller-retour dans la cavité résonante.

Deux autres miroirs sont des miroirs plans de repli afin de rendre la cavité plus compacte.

Le dispositif d'allongement de la cavité comprend un miroir plan à l'entrée de la cavité multi-passage, deux miroirs plans situés aux foyers de deux miroirs courbes de rayon courbure 0,5 m qui sont séparés par une distance d'environ 1m, un miroir plan à la sortie qui dirige le faisceau laser, vers le coupleur de sortie. En simple passage dans le dispositif d'allongement, les impulsions passent 6 fois sous les angles différents par rapport à l'axe optique du système, ce qui correspond à 12 passages par aller-retour dans la cavité laser.

La longueur totale de la cavité est 9,5 m, ce qui correspond à une cadence de 16,8 MHz.

L'invention ne saurait être limitée à la description qui précède et est susceptible de modifications avec l'évolution des technologies. Des substitutions et/ou des modifications dans la structure générale et dans les détails du présent dispositif peuvent être réalisées par un homme du métier sans s'écarter de l'esprit de la présente invention. Ainsi, il est possible de combiner indifféremment les différents modes de réalisations présentés pour obtenir une source laser ultrabrève émettant des impulsions lumineuses ayant une énergie supérieure à 100 nJ.

Une approche théorique a été développée pour expliquer la suppression des instabilités liées au régime déclenché dans des lasers ultrabrefs à ions terre rare (Ultrafast Ytterbium-Doped Bulk Lasers and Laser Amplifiers, Clemens Hoenninger, Hartung-Gorre Verlag, 1998, ISBN 3-89649-391-2).

La relation entre la puissance moyenne, l'énergie par impulsion et la puissance crête d'une source laser ultrabrève est donnée par:

$$P_{\text{moyenne}} = E_{\text{impulsion}} \times f_{\text{rép}} = P_{\text{crête}} \times \tau_{\text{impulsion}} \times f_{\text{rép}} \quad (1)$$

où  $\tau_{\text{impulsion}}$  est la durée d'impulsion et  $f_{\text{rép}}$  est la cadence de répétition avec

$$f_{\text{rép}} = \frac{c}{2 \times L_{\text{cav}}} \quad (2), \quad L_{\text{cav}} \text{ étant la longueur du chemin optique parcouru par les}$$

impulsions dans la cavité résonante.

Si le dispositif de blocage de modes est un absorbant saturable lent ( $t_{\text{relax}} > t_{\text{pulse}}$ ), qui se rétablit complètement pendant un aller-retour de cavité ( $t_{\text{relax}} \ll 1/f_{\text{rép}}$ ), dont les paramètres de saturation sont principalement décrits par son énergie de saturation  $E_{\text{sat},A}$  et sa profondeur de modulation  $\Delta R$ , la condition de

stabilité du train d'impulsion à modes bloqués est donnée par:

$$\left( \frac{g_{eff}}{g} - \frac{dg_{eff}}{dE_{pulse}} \right) \cdot E_{pulse}^2 > E_{sat,L} \cdot E_{sat,A} \cdot \Delta R \quad (3)$$

où  $g_{eff}$  est le gain effectif stationnaire, prenant en compte les effets de filtrage spectral et  $E_{sat,L}$  est l'énergie de saturation laser donnée par:

$$E_{sat,L} = \frac{h\nu}{m \cdot \sigma_{em}^{(L)}} A_{eff,L} \quad (4)$$

où  $\sigma_{em}$  est la section d'émission à la longueur d'onde laser,  $m$  est le nombre de passages dans le milieu laser par aller-retour de cavité, et  $A_{eff,L}$  est la taille du mode laser dans le matériau actif.

D'après la relation (1) liant l'énergie par impulsion et la cadence de répétition, et d'après la condition de stabilité (3), il se déduit qu'une cavité résonante 1 de grande longueur ou une configuration multi-passage dans le matériau actif 4, 5 supprime les instabilités liées au fonctionnement en mode déclenché dans le train d'impulsions.

Ces deux moyens permettent de saturer suffisamment le gain laser durant un aller-retour de cavité. Une cavité résonante 1 présentant un chemin optique long permet de générer d'après les équations (1) et (2) des impulsions ultrabrèves de forte énergie. Une configuration multi-passage où  $m$  est le nombre de passage dans le matériau actif 4, 5 par aller-retour de cavité est équivalente à une cavité résonante simple où le gain serait saturé par une impulsion ayant  $m$  fois l'énergie de l'impulsion circulant dans la cavité résonante.

Ceci est particulièrement intéressant pour les lasers dopés Ytterbium, mais s'applique également à tous les matériaux de faible section efficace d'émission.

Les figures 5 et 6 précisent des résultats obtenus en mettant en œuvre l'invention pour la réalisation d'un résonateur ayant une cavité optique longue et fonctionnant en régime à modes bloqués. Un dispositif d'allongement de la cavité permet de réaliser une cavité d'une longueur de 9,5 m. On obtient des impulsions femtosecondes à une cadence de 15,8 MHz.

Les figures 5 et 6 montrent le spectre et l'autocorrélation respectivement. Sur la Figure 5, l'axe des abscisses 29 représente la longueur d'onde (en nm) et l'axe des ordonnées 30 représente l'intensité mesurée. Sur la Figure 6, l'axe des abscisses 31 représente l'auto-corrélation normalisée (en ps) de l'impulsion dans le temps donnant la durée des impulsions et l'axe des ordonnées 32 représente l'énergie d'impulsion. La largeur spectrale est de 4,6 nm et la durée des impulsions est de 250 fs. La puissance moyenne est de 2 W correspondant à une énergie d'impulsion de 120 nJ.

La présente invention peut avantageusement être mise en œuvre avec une énergie par impulsion supérieure à 100 nJ en régime sub-picoseconde pour répondre à des besoins traditionnellement couverts par des systèmes de beaucoup plus forte énergie. Cette énergie par impulsion est notamment suffisante pour obtenir un effet d'ablation laser ou de modification de la structure interne des matériaux à traiter, par exemple dans les domaines suivants:

- marquage interne de matériaux transparents,
- changement d'indice de réfraction, par exemple pour la réalisation de guide d'ondes,
- micro- et nano-texturage,
- prototypage rapide par la création de micro-objets.
- chirurgie oculaire réfractive
- micro-usinage.

## REVENDEICATIONS

1. Source laser ultrabrève à ions terre rare comportant d'une part une cavité résonante (1) ayant une première face de sortie (2) partiellement réfléchissante et une deuxième face réfléchissante (3), et d'autre part un premier matériau actif (4), placé à l'intérieur de la cavité résonante, ayant une fluence de saturation supérieure à  $3 \text{ J/cm}^2$  et recevant un flux lumineux de pompe (5), ledit flux étant émis par une première source de pompe laser solide (7), ladite source émettant des impulsions lumineuses ayant une énergie  $E_L$ ,

caractérisée en ce que :

- la cavité résonante (1) présente une longueur de chemin optique parcourue par lesdites impulsions supérieure à 7,5 m de sorte que l'énergie  $E_L$  par impulsion soit supérieure à 100 nJ, ledit chemin optique comprenant au moins un passage dans ledit matériau actif (4),

- la source laser ultrabrève comprend des moyens pour allonger la cavité résonante (1) permettant d'étendre la longueur du chemin optique parcouru par lesdites impulsions lumineuses dans la cavité résonante (1) d'une source laser compacte, la matrice ABCD de propagation de ladite cavité résonante (1) étant proche de la matrice unitaire de sorte que les caractéristiques du faisceau lumineux effectuant des allers-retours dans la cavité résonante (1) sont inchangées. ❧

2. Source laser ultrabrève selon la revendication 1, caractérisée en ce que la longueur de chemin optique est comprise entre 7,5 m et 300 m.

3. Source laser ultrabrève selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que les moyens pour allonger la cavité comprennent au moins un dispositif d'allongement de la cavité (8) comportant à une première extrémité un premier miroir plan (9) et à l'autre extrémité un deuxième miroir plan (10), lesdits premier et deuxième miroirs plans (9, 10) étant placés respectivement au foyer respectif d'un premier et deuxième miroirs sphériques concaves (11, 12), ledit deuxième miroir plan (10) ayant un axe normal à sa surface incliné verticalement d'un angle  $\theta/n$  par rapport à un plan parallèle au plan contenant le premier miroir plan (9) de sorte qu'une impulsion lumineuse entrant dans ledit dispositif (8) sous un angle d'incidence  $\theta$  dans un plan vertical et sous un angle  $\Phi$  dans un plan horizontal, par rapport à la normale à la surface du premier miroir plan (9) subisse  $n/2$  réflexions sur le deuxième miroir sphérique (10) avant de sortir dudit dispositif.

4. Source laser ultrabrève selon la revendication 3, caractérisée en ce qu'un miroir d'entrée, placé en avant et espacé du premier miroir sphérique (11) permet l'injection et l'éjection des impulsions lumineuses dans le dispositif d'allongement de la cavité.

5. Source laser ultrabrève selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que la source laser comprend au moins un deuxième matériau actif (5) placé à l'intérieur de la cavité résonante (1), ledit deuxième matériau (5) actif recevant un flux lumineux de pompe (14).

6. Source laser ultrabrève selon la revendication 5, caractérisée en ce que ledit flux lumineux de pompe (14) est émis par une deuxième source de pompe laser solide (15).

7. Source laser ultrabrève selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée en ce que le nombre de passage dans chaque matériau actif (4,5) est supérieur ou égal à 2.

8. Source laser ultrabrève selon la revendication 7, caractérisée en ce que le nombre de passage dans chaque matériau actif (4, 5) est égal à 4.

9. Source laser ultrabrève selon la revendication 7 ou 8, caractérisée en ce qu'elle comprend un miroir dichroïque (13) placée entre ledit matériau actif (4, 5) et la source de pompe laser solide correspondante (7, 15), ledit miroir recevant les impulsions lumineuses dudit matériau actif (4, 5) et réfléchissant lesdites impulsions lumineuses vers le matériau actif (4, 5).

10. Source laser ultrabrève selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisée en ce que la source de pompe laser solide (15) est un laser semi-conducteur.

11. Source laser ultrabrève selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisée en ce que ledit matériau actif (4, 5) comprend des ions Ytterbium.

12. Source laser ultrabrève selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisée en ce que ledit matériau actif (4, 5) comprend des ions Néodyme.

13. Dispositif d'allongement d'une cavité laser définissant un axe, caractérisé en ce qu'il comprend deux miroirs plans placés au foyer respectif de deux miroirs sphériques concaves, lesdits foyers étant sur l'axe de la cavité et l'un des miroirs plans étant incliné d'un angle  $\theta/n$  par rapport à cet axe.

1/5

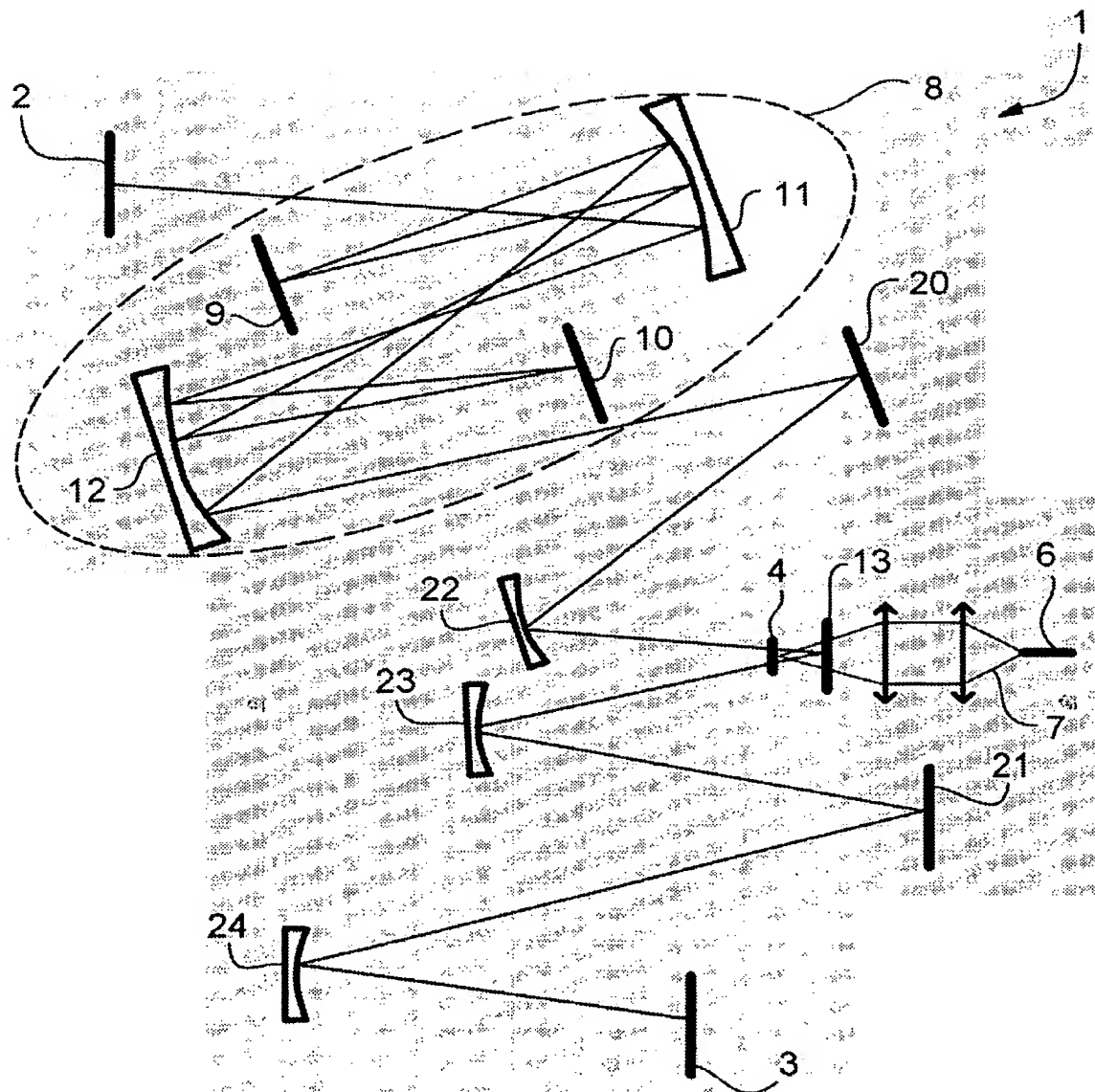


FIGURE 1

2/5

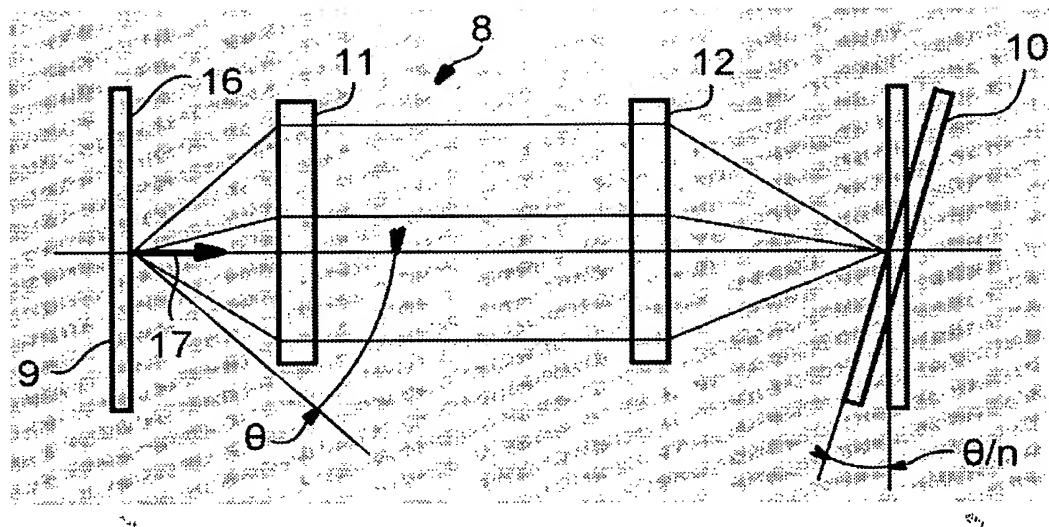


FIGURE 2



3/5

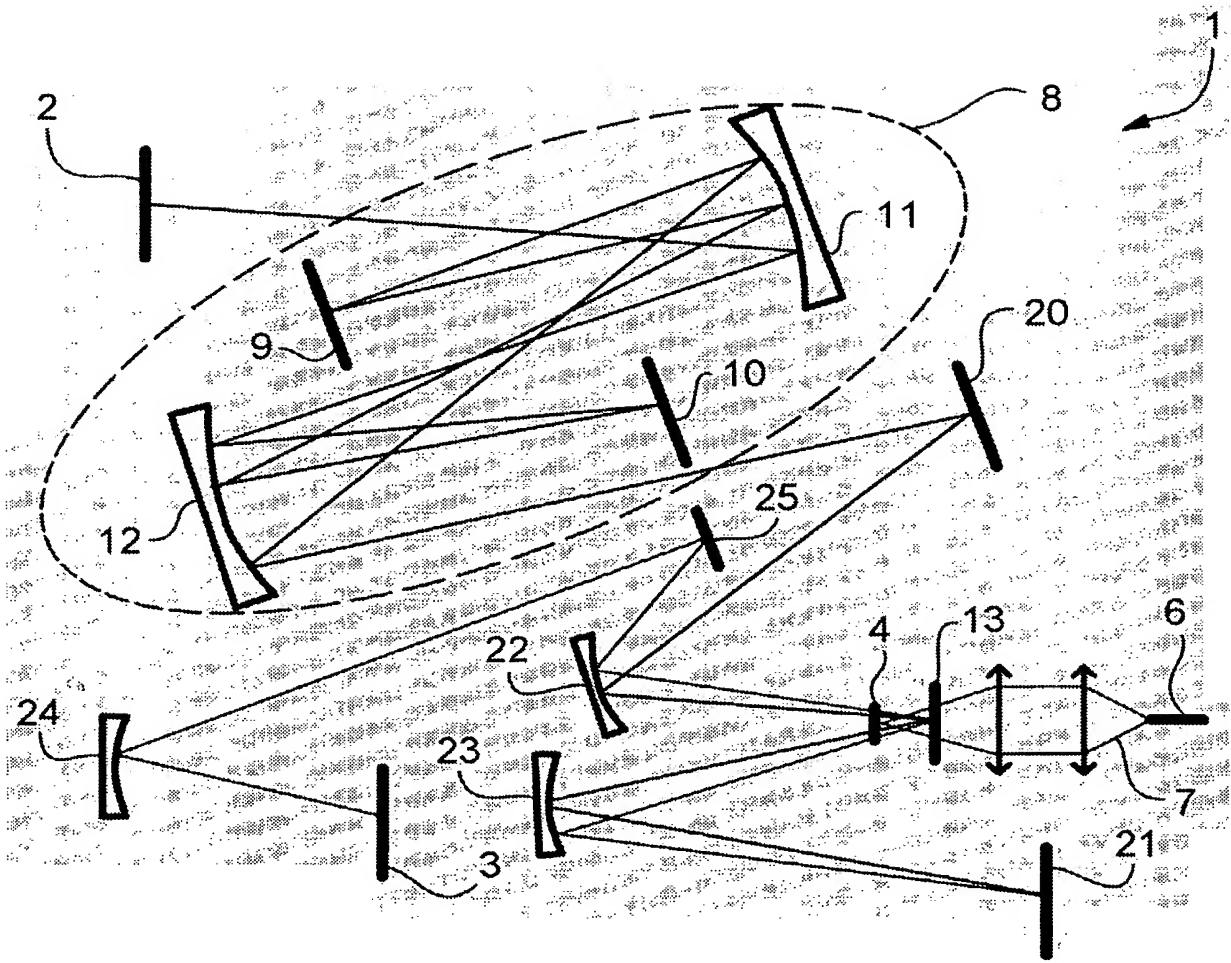


FIGURE 3

4/5

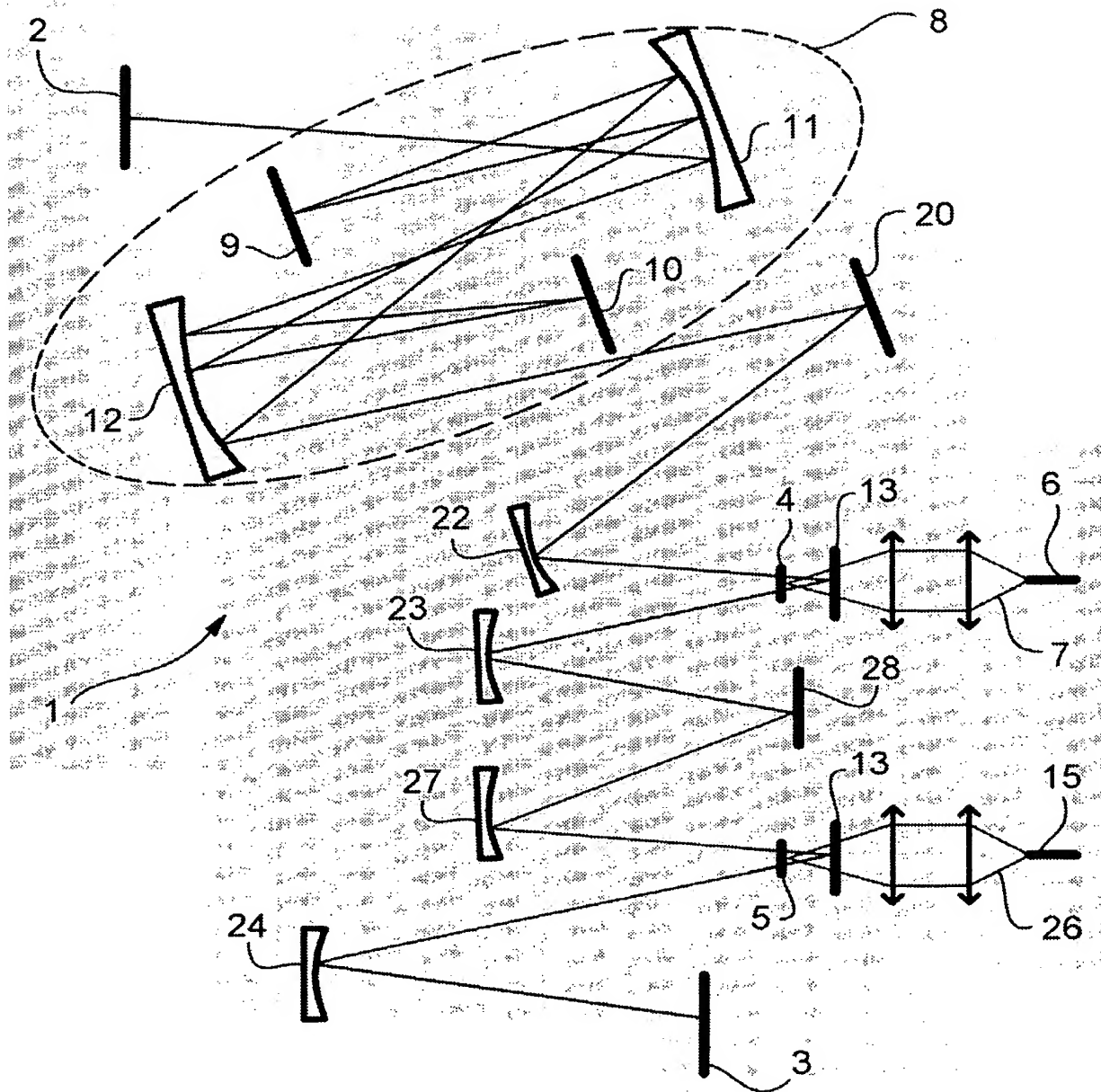


FIGURE 4

5/5

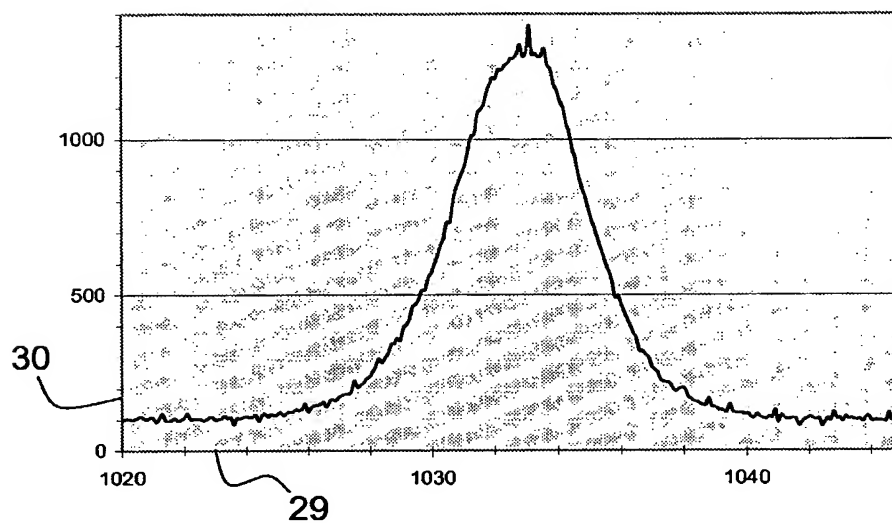


FIGURE 5

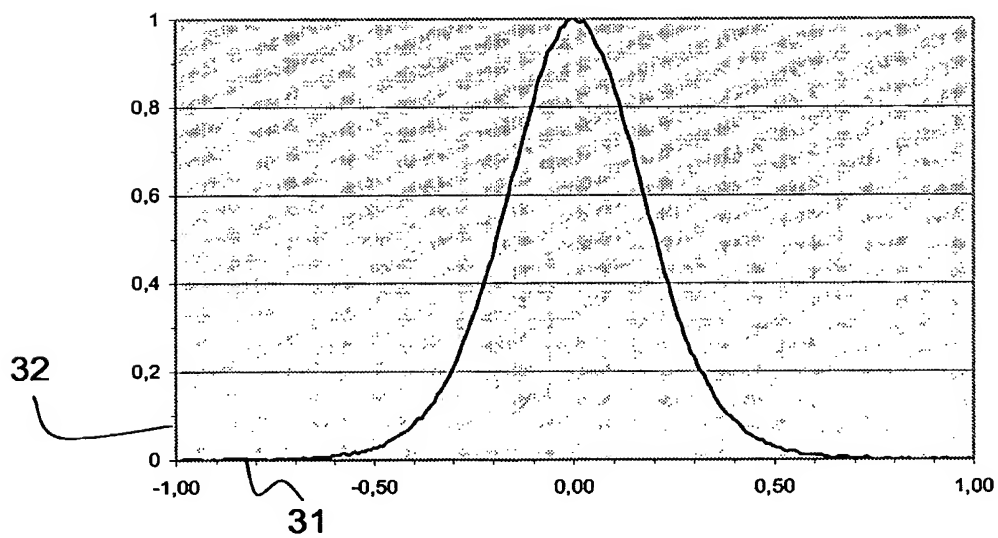


FIGURE 6